

Simulazioni fluidodinamiche di geometrie complesse

Milovan Perič

CD-adapco, Direttore dello Sviluppo

Abstract

L'uso della CFD si sta diffondendo in tutte le aree ingegneristiche. I domini di flusso sono in genere molto complessi e questo comporta richieste stringenti sui metodi di costruzione della griglia di calcolo e di risoluzione. In questo articolo, vengono illustrati i più recenti sviluppi nel trattamento delle geometrie complesse nella CFD. Vengono sottolineati gli aspetti di integrazione CAD, generazione automatica della griglia di calcolo, ed ottimizzazione della griglia di calcolo. Lo scopo di queste metodologie è l'ottimizzazione del tempo di analisi in tutte le fasi di una simulazione CFD e allo stesso tempo un miglioramento nella qualità della soluzione.

The use of CFD is spreading in all areas of engineering. The flow domains are usually very complicated, which places high demands on both meshing and solution methods. In this article, the newest developments in the handling of complex geometries in CFD are presented. The emphasis is on CAD integration, automatic mesh generation, and optimization of mesh quality. The aim of all of these measures is the shortening of analysis time in all phases of a CFD simulation and at the same time an improvement of solution quality.

Keywords: CFD, metodi a volumi finiti, geometrie complesse, meshatura automatica.

Introduzione

La maggior parte delle condizioni di flusso di interesse ingegneristico coinvolge geometrie tridimensionali complesse. Sovente, il punto di partenza per una simulazione CFD [1] è un dato CAD tridimensionale, fornito da disegnatori e progettisti all'analista CFD; a sua volta, l'analista importa i dati nel software CFD e li elabora, finché non ha prodotto una griglia di calcolo CFD soddisfacente.

Il dominio di calcolo fluido non è facile a definirsi: i dati CAD 3D descrivono le parti circondate dal fluido, ma l'estrazione del volume fluido da simulare è tutt'altro che un compito banale. Gli analisti CFD dedicano, per questo, buona parte del loro tempo all'attività di importazione e pulizia del CAD. Diventa quindi indispensabile uno strumento per la pulizia e riparazione automatica di superficie CAD.

Uno strumento automatico deve facilitare le semplificazioni e rimozioni geometriche di dettagli irrilevanti per la fluidodinamica, che complicano inutilmente la costruzione della griglia di calcolo CFD.

Lo strumento di pulizia/riparazione CAD, denominato "Surface Wrapping" (inviluppo di su-

perficie), è particolarmente indicato quando si ha a che fare con grandi assiemi ("assemblies") di dati CAD come la vettura illustrata in Fig. 1.

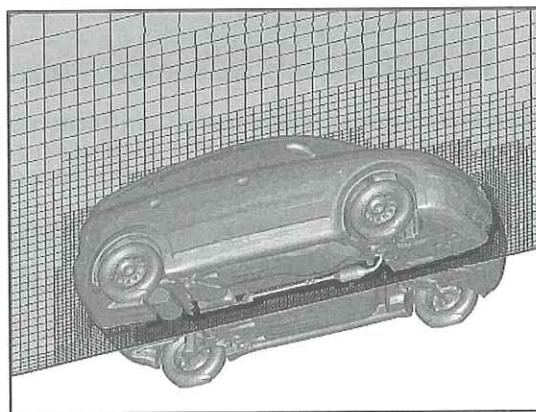


Fig. 1 - Un esempio di tecnica "Surface Wrapping" (inviluppo di superficie) per creare la superficie fluidodinamica relativa ad un'analisi aerodinamica esterna. L'inviluppo della superficie CAD ha permesso di affrontare la modellizzazione della complessa geometria del sottopiano della vettura. La griglia di calcolo, mostrata sul piano di simmetria, è stata prodotta automaticamente con celle a maggioranza esaedriche (cortesia di AUDI AG).

Integrazione della CFD nel CAD

L'approccio descritto precedentemente (importazione geometrie CAD) è stato fino ad ora lo standard nella CFD; questo metodo di lavoro, a valle del processo di progettazione CAD, sta negli ultimi tempi cambiando, dato il maggior coinvolgimento della CFD nei processi aziendali come strumento di PLM (Product Lifecycle Management).

La tecnologia CD-adapco mette oggi a disposizione dei "plug-in" che permettono di immergere il software CFD all'interno di alcune delle principali piattaforme CAD industriali: SolidWorks, Pro/ENGINEER, Unigraphics 18 / NX, CATIA V5. L'immersione CAD permette al progettista di creare il modello fluidodinamico ritagliato direttamente sul modello CAD, senza passaggi intermedi.

Il primo vantaggio tangibile della metodologia "integrazione CAD" è che la parametrizzazione geometrica del modello CAD rimane associata alla CFD; diventa pertanto immediato condurre studi di ottimizzazione, mediante cicli di modifica e ricostruzione automatica (cicli "build&run"). Molto interessante è la possibilità di accoppiamento della procedura summenzionata ad algoritmi di ottimizzazione, che guidano la costruzione di modelli ottimali in base a criteri funzionali e vincoli geometrici imposti dall'utente.

Inoltre, mediante l'utilizzo di "parti fluide" e "parti solide", si assiste all'evoluzione dalla fluidodinamica numerica o CFD ("Computational Fluid Dynamics") ad un più generale approccio di meccanica dei continui numerica o CCM ("Computational Continuum Mechanics"), in quanto vengono costruiti sia il dominio fluido che il dominio solido.

Gli strumenti CFD integrati nel CAD non devono essere un semplice strumento per costruire griglie di calcolo, bensì di un software autonomo basato sul solutore CFD che viene utilizzato, in modo trasparente, come "motore". Rimane sempre aperta la possibilità di uscire dallo strumento CAD per comunicare, grazie all'identità dei formati CFD, direttamente con il solutore.

La Fig. 2 illustra un esempio di integrazione CAD. Le condizioni al contorno (portate, pressioni) e tutti gli altri parametri di simulazione CFD sono creati sul modello CAD e rimangono ad esso associati e conservati nel caso di modifiche geometriche. La griglia di calcolo viene generata automaticamente.

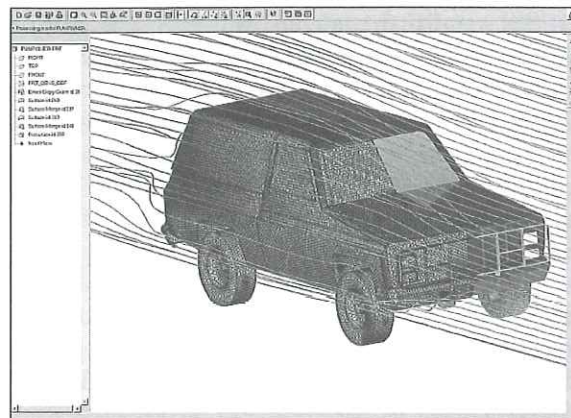


Fig. 2 - Un esempio di integrazione CAD (STAR-*Pro/E*) in cui vengono illustrati una quantità scalare - lo sforzo di parete sulla superficie del veicolo - e le linee di flusso attorno allo stesso, all'interno dell'ambiente CAD *Pro/ENGINEER* e con il software *STAR-CCM+*.

Qualità delle griglie di calcolo CFD

Dal momento che le geometrie da simulare possono essere di complessità arbitraria, la procedura di costruzione della griglia di calcolo dev'essere totalmente automatizzata, in quanto l'intervento manuale da parte dell'analista CFD richiede oneri eccessivi di tempo e competenze tecniche specifiche.

Le tecniche del tipo a blocchi strutturati sono raramente usate in quanto a basso grado di automazione; le griglie di tipo non strutturate sono la sola scelta pratica a disposizione.

Lo strumento di costruzione della griglia CFD deve rispondere ai seguenti requisiti:

- Gli strati prismatici devono essere creati conformemente alle pareti del dominio fluido nel caso di calcolo di flussi viscosi; i prismi possono avere una base poligonale arbitraria. È di fondamentale importanza che un numero opportuno di celle di calcolo abbia due facce parallele alla parete, in modo da avere un trattamento adeguato dello strato limite. Componenti come condotti e valvole dovrebbero pertanto essere modellati con griglie di tipo prismatico a parete, sia per motivi di accuratezza (trattamento dello strato limite) che per ragioni di efficienza (permettere celle più allungate, ottimizzandone il numero).
- La densità della griglia deve poter essere controllabile sia da parte dell'utente che del solutore (adattatività della griglia).
- La qualità della griglia deve essere controllata e, dove necessario, la griglia deve essere riparata automaticamente.

Le griglie di calcolo del tipo più comunemente diffuso sono composte da tetraedri, solitamente con uno strato di prismi a base triangolare per il trattamento dello strato limite.

Se da un lato le griglie tetraedriche sono le più facili da generare, la loro qualità è spesso discutibile. Gli strati prismatici di parete risolvono i problemi associati ai tetraedri piatti vicino a parete; tuttavia, il fatto che un tetraedro abbia solo quattro facce lo rende meno adatto, rispetto a celle di calcolo esaedriche o poliedriche, alla corretta approssimazione dei flussi diffusivi.

Il problema inerente alle griglie tetraedriche è che i primi quattro vicini di una cella di calcolo non sono sufficienti per garantire la stessa accuratezza di una cella con sei o più facce, nel calcolo dei gradienti. Si cerca di ovviare a questo inconveniente aumentando il numero di tetraedri per raggiungere la stessa accuratezza di simulazione di un flusso viscoso basato su esaedri o poliedri.

Le celle di calcolo esaedriche sono probabilmente ottimali in termini di efficienza ed accuratezza, ma sono molto difficili da generare automaticamente.

Le celle di calcolo di tipo poliedrico, d'altronde, possono essere generate con la stessa facilità dei tetraedri, ma ogni poliedro ha più elementi "primi vicini" rispetto ad un tetraedro e garantisce quindi maggiore accuratezza.

Tornando alle celle di tipo esaedriche che non possono essere facilmente generate in modo automatico, CD-adapco ha lanciato già nel 1998 una tecnica [2] [3] [4] detta "trimmed cell technology", per creare celle con una larga predominanza di esaedri ed una piccola minoranza di poliedri e prismi. Con questo metodo, una cosiddetta "sottosuperficie" viene creata su di una versione matematicamente "raggrinzita" o "gonfiata" della geometria (rispettivamente, nel caso di flusso interni od esterni). Il software crea, in base alle dimensioni dell'oggetto, una griglia cartesiana che viene poi matematicamente "fresata" dalla sottosuperficie; gli elementi esaedrici tagliati sono di tipo poliedrico (numero arbitrario di facce). Fra la superficie e la sottosuperficie viene creato una griglia di calcolo composta di prismi; un esempio di griglia di calcolo di questo tipo è illustrato in Fig. 3, in alto. La Fig. 3, in basso, illustra una griglia di calcolo a poliedri.

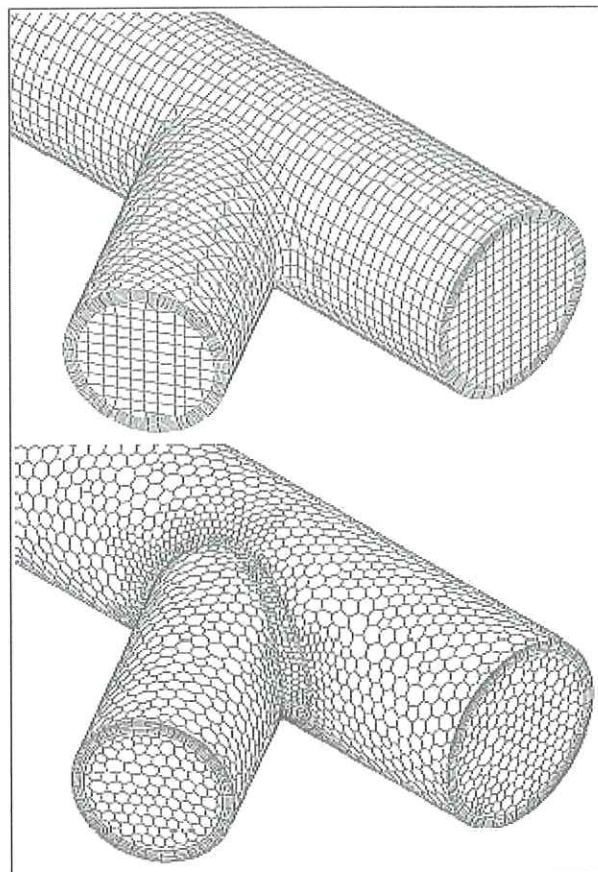


Fig. 3 - Esempi di griglie di calcolo generate automaticamente: griglia con celle prevalentemente esaedriche (in alto) e griglia con celle poliedriche (in basso); in entrambi i casi, sono presenti cinque strati di celle prismatiche a parete.

Sia la griglia di calcolo a maggioranza di esaedri che la griglia a poliedri sono state generate con uno strumento CFD integrato nel CAD. I parametri specificati dall'utente sono stati in questo caso: spessore dello strato di parete, numero di strati prismatici, e dimensione media delle celle di calcolo.

Quale griglia di calcolo è la migliore?

Si tratta di una domanda che ci viene spesso rivolta. Tranne eccezioni poco significative, tutti i tipi di griglia di calcolo portano, con successivi raffinamenti, asintoticamente alla stessa soluzione; tuttavia, lo sforzo richiesto per ottenere una soluzione ad un determinato grado di accuratezza dipende grandemente dal tipo di griglia e dalla sua qualità.

Una raccomandazione di portata generale è l'utilizzo di griglie prismatiche lungo le pareti e là dove la direzione del flusso è data dalla geometria (condotti, canali, ecc.); le facce laterali

dei prismi saranno allineate al flusso, mentre le basi dei prismi saranno ortogonali allo stesso. D'altro canto, in caso di flussi senza una direzione privilegiata (ricircolanti), le celle poliedriche sono in genere le più efficienti. Le celle tetraedriche sono le meno adatte, in quanto non hanno l'ortogonalità delle celle esaedriche e sono richieste in numero maggiore rispetto alle celle poliedriche, come vedremo oltre.

I sistemi knowledge-based

È possibile consolidare in un sistema esperto, o per meglio dire "knowledge-based", le raccomandazioni sul trattamento dei dati CAD, sulla costruzione della griglia di calcolo ed ulteriori considerazioni di modellistica chimico-fisica. Si tratta dei sistemi esperti di CD-adapco, specializzati nei singoli settori ingegneristici.

Ad esempio:

- Nel trattamento dell'aerodinamica e dei flussi nel sottocofano di una vettura, verranno parametrizzati gli aspetti di pulizia del CAD, il raffinamento della griglia di calcolo a parete e nella scia della vettura; a livello di modellazione fisica, verranno parametrizzati dettagli relativi a radiatori e ventole nel sottocofano, oppure l'aeroacustica degli specchietti ed altri componenti.
- Nel trattamento di celle a combustibile di tipo PEM, gli aspetti parametrizzabili saranno quelli relativi alla modellistica elettrochimica. Il CAD sarà spesso assente, per cui saranno messi a disposizione librerie di geometrie predefinite.

La possibilità di utilizzo di "macro" basate su di un linguaggio esperto parametrico, aperto all'utente, e la successiva possibilità di accedere ai parametri delle macro mediante pannelli scritti in TCL/TK, permettono agli utenti esperti di scrivere i propri sistemi knowledge-based utilizzando il software CD-adapco come motore trasparente.

Solutori per poliedri

Un solutore CFD in grado di risolvere celle poliedriche (come nel caso dei prodotti STAR-CCM e STAR-CCM+ di CD-adapco) è in grado di gestire celle di calcolo con numero arbitrario di facce. Questa capacità permette un trattamento unificato di svariate situazioni:

- raffinamento locale delle celle di calcolo;
- giustapposizione di blocchi di griglie con topologia diversa;
- scorrimento relativo di superfici;
- condizioni al contorno di tipo ciclico.

Un altro vantaggio è dato dalla possibilità di ottimizzare le griglie. Senza i vincoli topologici sulle celle della griglia, ci sono maggiori gradi di libertà per modificare le celle di bassa qualità. Ad es., le celle concave possono essere suddivise e le celle piatte possono essere fuse con altre. La movimentazione arbitraria delle griglie, sempre grazie all'arbitrarietà degli elementi, diventa più efficiente.

Non ci sono in pratica limiti alla possibilità di manipolazione delle griglie; la ricerca in questo settore crescerà nel futuro, in parallelo all'automazione del processo di creazione delle griglie di calcolo.

Esempi di celle di calcolo poliedriche

La figura 4 mostra due tipiche celle di calcolo poliedriche.

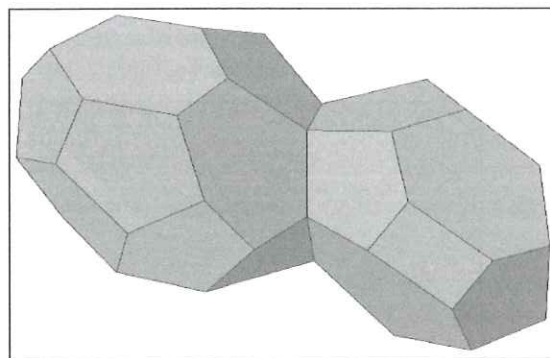


Fig. 4 - Due tipici volume di controllo poliedrici, estratti dalla griglia di fig. 3 in basso.

Per creare questi elementi, si utilizza un cosiddetto software "meshatore" (costruttore di griglie di calcolo) che permette di accedere a tutte le tipologie di griglia di calcolo qui descritte:

- griglie di calcolo esaedriche strutturate a blocchi;
- griglie di calcolo automatiche, tetraedriche;
- griglie di calcolo automatiche, prevalentemente esaedriche;
- griglie di calcolo poliedriche;
- griglie di calcolo ibride (ad es. nucleo esaedrico+tetraedri+prismi a parete).

Sono inoltre possibili le operazioni preliminari di passaggio fra il CAD e la griglia di calcolo fluida:

- nel caso si operi direttamente all'interno del CAD, oppure su superfici particolarmente corrette, copertura della superficie con triangoli;
- inviluppo di superficie.

Per validare l'efficienza delle celle poliedriche, sono stati condotti numerosi casi di confronto rispetto a soluzioni analitiche o casi numerici molto accurati (simulati con celle di calcolo esaedriche ad alta densità).

Tali confronti hanno indicato che, a parità di accuratezza, le griglie di tipo poliedrico richiedono metà della memoria e da 5 a 10 volte meno tempo di calcolo rispetto a celle tetraedriche (a parità di discretizzazione e metodo di soluzione).

Uno di questi confronti era relativo al calcolo del flusso attorno ad una sfera montata su di un supporto cilindrico in una galleria del vento. La figura 5 mostra le sezioni di una griglia tetraedrica (composta da 650 000 elementi) ed una griglia poliedrica (composta da 138 000 elementi). Entrambe le griglie presentavano cinque strati di celle prismatiche sia sulla superficie della sfera che del supporto.

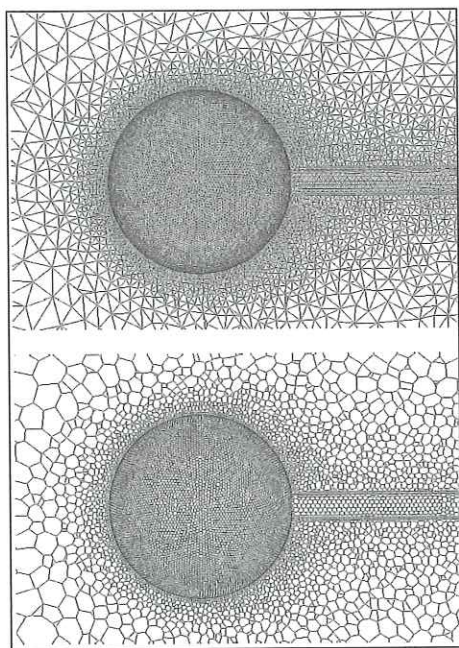


Fig. 5 - In alto, sezione di una griglia di calcolo tetraedrica (composta da 650000 elementi); in basso, sezione della griglia poliedrica (composta da 138000 elementi).

La Fig. 6 illustra la convergenza del calcolo relativo alle due griglie.

Come in tutti gli altri esempi di validazione, nel caso di griglie a poliedri il rateo a cui si riduce il residuo normalizzato è molto più alto.

Questo è in parte dovuto al fatto che la griglia poliedrica presenta 4.7 volte meno elementi, ma un contributo sostanziale è apportato dalle migliori proprietà dei poliedri rispetto ai tetraedri.

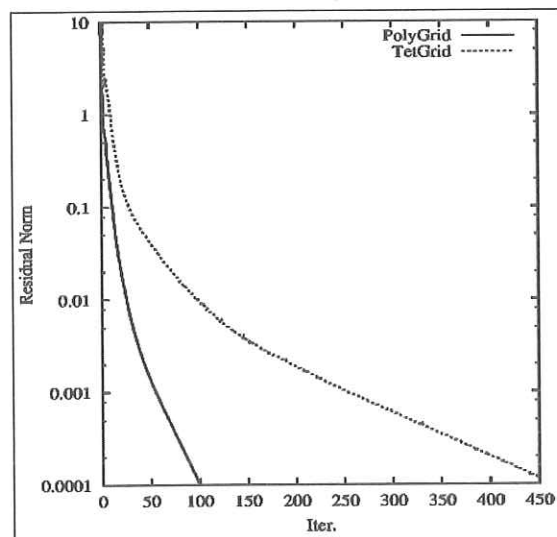


Fig. 6 - Convergenza dei calcoli per flusso laminare, con numero di Reynolds $Re=100$ attorno alla sfera.

La Fig. 7 illustra il confronto di profili di velocità assiali e radiali calcolati su due diverse sezioni.

Si può notare come, nonostante le maggiori dimensioni delle celle poliedriche, i profili siano più regolari rispetto alle celle tetraedriche.

Questa è un'altra indicazione relativa alla maggiore accuratezza dei gradienti calcolati con le celle poliedriche; tale accuratezza è riconducibile al fatto che più nodi vicini contribuiscono al gradiente al centro di una cella, anche se le distanze sono maggiori.

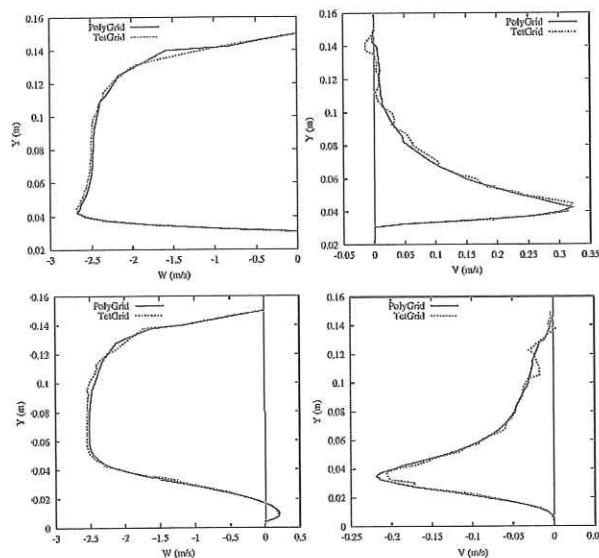


Fig. 7 - Confronto fra i profili della componente assiale (a sinistra) e radiale (a destra), calcolati su di una griglia tetraedrica (650000 elementi) e poliedrica (138000 elementi), attraverso il centro della sfera (in alto) e a 0.814 diametri a valle dal centro della sfera (in basso).

Per concludere, la Fig. 8 mostra un'applicazione industriale in cui le griglie di calcolo poliedriche vengono utilizzate per calcolare sia la parte fluida che la parte solida.

A partire da un modello CAD di descrizione della parte solida (la "testa" di un motore), sono stati ottenuti le due griglie per il calcolo fluidodinamico e per il trasporto del calore nel solido.

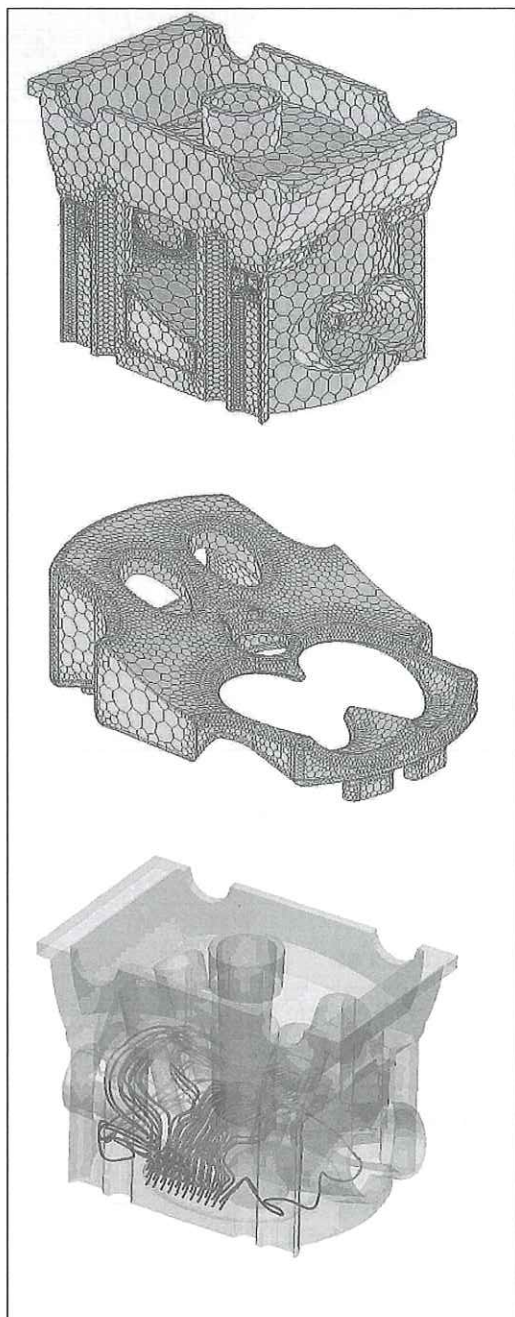


Fig. 8 - Calcolo del flusso e trasporto del calore coniugato in una testa motore: in alto, griglia poliedrica per l'assieme fluido/solido; al centro, estrazione della sola griglia fluidodinamica; in basso, linee di flusso nel dominio fluido.

Conclusioni

Sono stati recentemente introdotti miglioramenti nelle metodologie di simulazione fluidodinamica di geometrie complesse, in particolare in tre aree:

1. creazione di una superficie chiusa che identifica il dominio fluido, mediante inviluppo di superficie o integrazione CAD;
2. costruzione automatica di griglie di calcolo ad esaedri predominanti, oppure a poliedri;
3. sviluppo di una famiglia di solutori (STAR-CCM e STAR-CCM+) in grado di operare sulle griglie di calcolo poliedriche.

Le tendenze tecniche e di mercato, per un aumento di produttività dalla CFD ed l'integrazione nel sistema Product Lifecycle Management, sono:

- ottimizzazione automatica della qualità della griglia e movimentazione della griglia;
- estensione delle simulazioni dalla fluidodinamica (CFD) alla meccanica dei continui (CCM);
- sviluppo di sistemi specifici (knowledge-based) per aree specialistiche.

CD-adapco è attivamente presente in tutte le aree summenzionate ed intende guidare, nei prossimi anni, lo sviluppo delle tecnologie CFD e CCM d'avanguardia.

Bibliografia

- [1] J. H. Ferziger, and M. Perić, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 2001, Springer-Verlag
- [2] W. Oaks, S. Paoletti, *Polyhedral Mesh Generation*, pp.57-67, in: Proceedings, 9th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, October 2000
- [3] S. Paoletti, *Polyhedral Mesh Optimization Using the Interpolation Tensor*, pp. 19-28, in: Proceedings of the 11th International Meshing Round Table, September 15-18, 2002 Ithaca NY
- [4] S.Paoletti, *Practical Optimization-Based Smoothing of Tetrahedral Meshes*, in: Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulation, Whistler, British Columbia, Canada, September 25-28, 2000.